

LITOLOGIA I TECTÒNICA DEL CARST DE MALLORCA

LITHOLOGY AND TECTONICS OF THE MAJORCAN KARST

Joan J. FORNÓS¹ & Bernadí GELABERT¹

Resum

La litologia i disposició estructural de les roques que conformen l'illa de Mallorca són una magnífica base per al desenvolupament dels fenòmens de tipus càrstic. A Mallorca hi són representats pràcticament sense interrupció materials des del Carbonífer fins al Pleistocè (hi manca part del Cretaci superior i Paleogen inferior). La sèrie té una potència aproximada de 3.000 m, dominant àmpliament, àdhuc els detrítics, els dipòsits de tipus carbonatat, tant calcàries com dolomies, que són els que formen els relleus més importants de l'illa. L'estructuració en forma d'escates encavalcants dirigides cap al NW que va tenir lloc durant l'orogènia alpina, va donar com a resultat uns vessants SE amb pendents més suaus, els quals ja presenten una certa maduresa en el seu modelatge, mentre que els vessants NW presenten pendents més forts i un relleu juvenil. A més, el fet que a la base de les làmines encavalcants s'hi trobin els materials impermeables del Keuper, juntament amb la disposició imbricada dels encavalcaments, suposa l'existència de zones permeables (dolomies i calcàries del Retià i Lias) aïllades per àrees de materials impermeables.

Abstract

The lithology and structural setting of the rocks which form the island of Mallorca are magnificent bases on which karstic phenomena develop. Almost every geological period is continually represented here, from the Carboniferous to the Pleistocene (only part of the Upper Cretaceous and Lower Paleogene being absent). The approximate thickness of the stratigraphic sequence is 3,000 m in which carbonate deposits (not only limestones but also dolomites) constitute the most important lithologies. The main structure consists of thrust sheets imbricated in a NW transport direction. Such deformation took place during the alpine orogenia and led to SE declivities showing smoother slopes, which present today a more ancient modelling; whereas the NW slopes are steeper and their relief is younger. Furthermore, the existence of impermeable materials from the Keuper at the base of the thrust sheets, added to the overlapping setting thrusts, cause permeable zones (dolomites and limestones from the Rhaetian and Lias) to remain isolated by areas of impermeable material.

Introducció

Els aspectes morfològics i morfodinàmics de l'estudi i desenvolupament d'un carst no poden ésser estudiats de forma aïllada, sinó que han de quedar enquadrats dins del marc geològic en el qual es desenvolupen. Dins d'aquest marc, hi resalten els as-

Introduction

The morphological and morphodynamic aspects of the study of the karst cannot be assessed separately, as they should be framed within the geological context in which they once developed. Within this context, the stratigraphical, sedimentological, petrological, tectonic and hydrogeological aspects are remarkable. The aim of this paper is to make a simple description of the

¹ Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Ctra de Valldemossa km 7,5. E-07071 Palma de Mallorca.

pectes estratigràfics, sedimentològics, petrològics, tectònics, i per suposat els hidrològics. L'objectiu d'aquest treball és fer una descripció planera tant de les característiques estratigràfiques com de les tectòniques en què es desenvolupen els fenòmens relacionats amb la dinàmica del carst a Mallorca.

Des del punt de vista morfològic i morfodinàmic l'illa de Mallorca presenta una àmplia varietat d'exemples, tant endo- com exocàrstics, desenvolupats en les formacions carbonatades existents a l'illa. Aquestes formacions, presents de forma pràcticament contínua des del Triàsic mitjà, estan afectades per una complexa estructuració tectònica que queda emmarcada dins del joc de la tectònica de plaques del Mediterrani Occidental, a cavall entre les plaques europea i africana, donant lloc a una forta orografia.

stratigraphic and tectonic characteristics which control the dynamics of karst in Mallorca.

From the morphological and morphodynamic points of view, the island of Mallorca features a wide range of endo- and exokarstic examples developed within its carbonate assemblages. These are present almost continuously since the Middle Triassic, and have been affected by a complex tectonic structuration, framed within the context of the plate tectonics of the western Mediterranean (an area placed between the European and the African plates) which caused a strong orography.

The geological structure as well as the lithological distribution affect the geomorphology of the island, in which three great zones can be differentiated (Figure 1). The steepest, known as

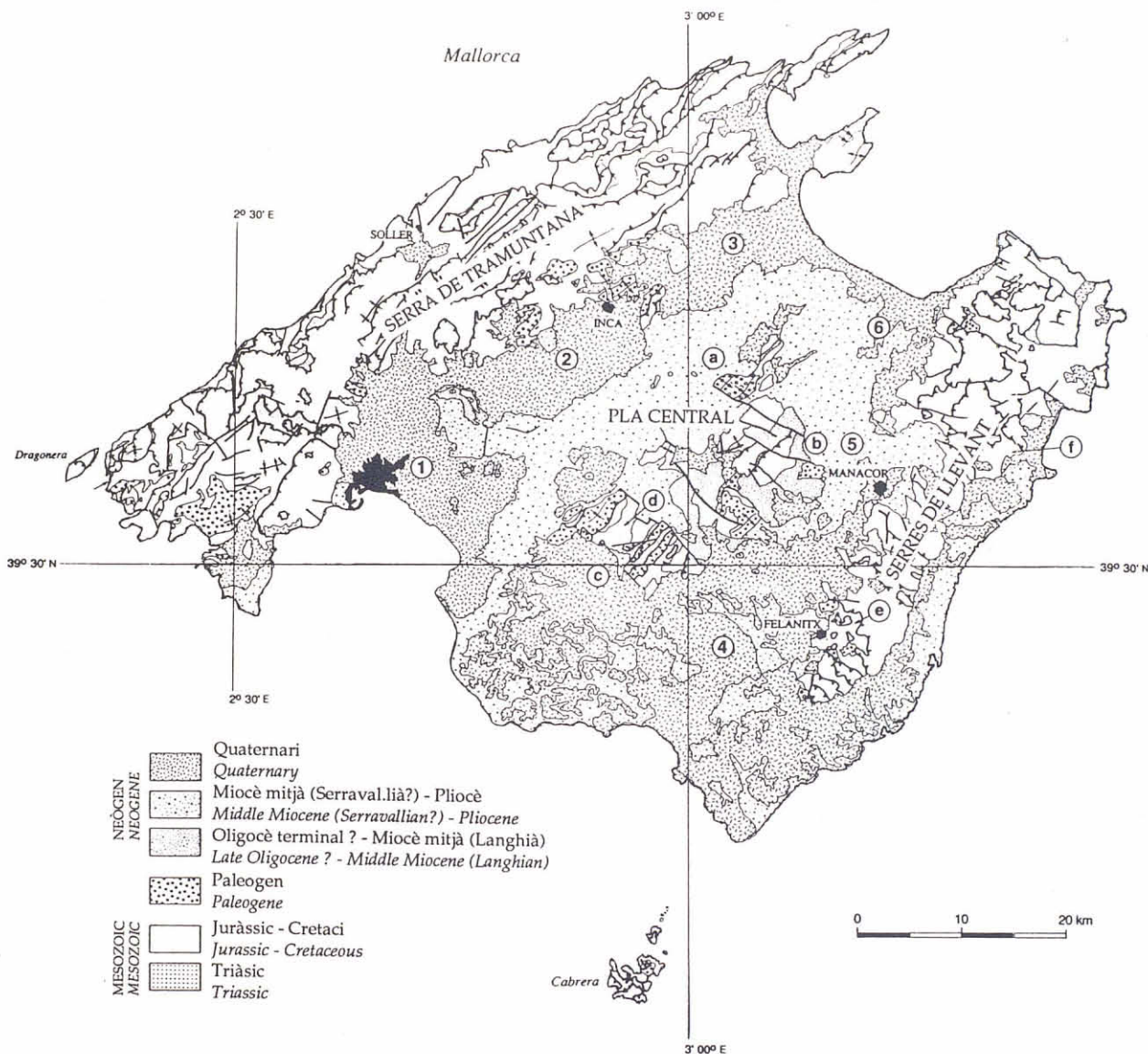


Figura 1: Mapa geològica de l'illa de Mallorca (ROCA, 1992).
1- Cubeta de Palma; 2- Cubeta d'Inca; 3- Cubeta de sa Pobra; 4- Cubeta de Campos; 5- Cubeta de Manacor; 6- Cubeta de Sta. Margalida; a- Sineu; b- Bonany; c- Massís de Randa; d- Puig de Randa; e- sinclinal de Son Macià-Sant Salvador; f- Son Servera.

Figure 1: Geological map from the Island of Mallorca (ROCA, 1992).
1- Palma Basin; 2- Inca Basin; 3- Sa Pobra Basin; 4- Campos Basin; 5- Manacor Basin; 6- Sta. Margalida Basin; a- Sineu; b- Bonany; c- Massís de Randa; d- Puig de Randa; e- Son Macià-Sant Salvador syncline; f- Son Servera.

L'estructura geològica així com la distribució litològica condicionen la geomorfologia de l'illa, en la qual es poden diferenciar tres grans zones (Figura 1). La més abrupta, la Serra de Tramuntana, està formada per dipòsits principalment d'edat mesozoica, fortament estructurats. Es localitza a la part nord-occidental de l'illa i està alineada en direcció NE-SW on hi ha les principals elevacions (Puig Major, 1.445 m). Les Serres de Llevant, localitzades al llevant mallorquí, presenten uns relleus menys abruptes, si bé també estan formades per dipòsits d'edat mesozoica (més dolomítics) i estan afectades per la mateixa tectònica alpina. Finalment la zona del Pla, al centre, està formada principalment per dipòsits post-orogènics en disposició tabular i d'edat neògena.

Aspectes estratigràfics i sedimentològics

La història estratigràfica de Mallorca comprèn des del Carbonífer fins al Quaternari amb un important hiatus a la base del Terciari (Figura 2). La sedimentologia dels materials presents és altament complexa i molt variada, amb una gran superposició de diferents ambients sedimentaris, que abasten facies de tipus lacustre, litorals, de plataforma, de talús i facies pelàgiques, fruit de les diverses etapes en l'estructuració tectònica. El fet comú més destacable és

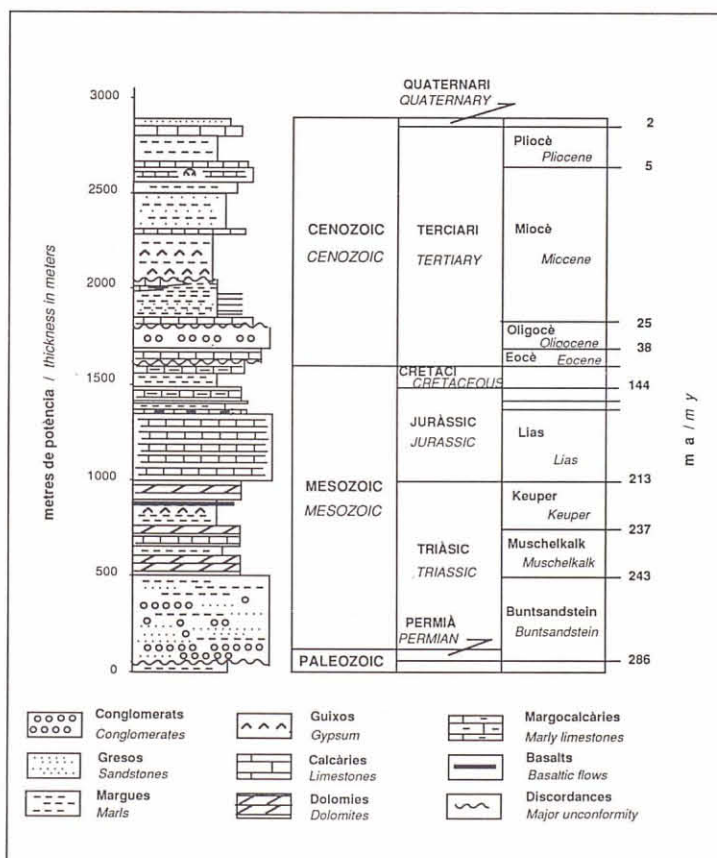
Serra de Tramuntana, is constituted by well-structured deposits, mainly of Mesozoic age. It is on the northwestern side of the island and is aligned in a NE-SW direction, where the main peaks stand (e.g. Puig Major 1,445 m). The Serres de Llevant mountains, in the East, show less rough topography despite the fact that they are also composed of Mesozoic deposits (more dolomitic) and show the same alpine tectonic influence. Finally, El Pla area, settled in the centre of the island, is mainly formed by tabular post-orogenic deposits from the Neogen.

Stratigraphical and sedimentological aspects

The stratigraphical history of Mallorca encompasses the Carboniferous to the Quaternary, with an important gap at the base of the Tertiary (Figure 2). The sedimentology of the extant materials is highly complex and shows great variation regarding its different sedimentary environments, which include lake, littoral, platform, slope and pelagic facies, all resulting from the diverse stages of tectonic setting. The most remarkable fact in common to almost all deposits is their carbonate composition, the scarcest being siliciclastic materials. This reflects not only the potential representation of the stratigraphic series,

Figura 2:
Columna litoestratigràfica sintètica de Mallorca (RODRÍGUEZ-PÉREA, 1992).

Figure 2:
Synthetic lithostratigraphical column from Mallorca (RODRÍGUEZ-PÉREA, 1992).



la composició carbonatada de la gran majoria dels dipòsits, amb una escassa representació dels dipòsits de tipus siliciclàstic. Aquest fet queda reflectit, tant en la representació potencial en la sèrie estratigràfica com en la presència d'afloraments cartogràfics en superfície.

PALEOZOIC

Els materials més antics que afloren a Mallorca corresponen a pelites grises, que intercal·len nivells de quarsarenites amb crinoïdeus i pol·len que daten aquests dipòsits com a Carbonífer (RODRÍGUEZ-PEREA & RAMOS-GUERRERO, 1984). Presenten un lleuger grau de metamorfisme i estan afectats per l'orogènia herciniana que ha deixat la seva empremta en forma d'un intens plegament afectat d'esquistositat. Per la presència en reduïts afloraments al peu de la Serra de Tramuntana i per la composició siliciclàstica, no té interès per a l'estudi del carst de Mallorca.

MESOZOIC

Els dipòsits que conformen la seqüència del Mesozoic a Mallorca presenten una potència superior als 1.500 m, els 1.000 m superiors dels quals corresponen, amb petites interrupcions, a materials carbonatats. Els materials mesozoics constitueixen la major part dels afloraments presents en les zones estructurades: Serra de Tramuntana, Serres de Llevant i petites elevacions del Pla de Mallorca. Els relleus més abruptes d'aquestes serres estan constituïts pels dipòsits de calcàries i dolomies pertanyents al Juràssic. Aquests dipòsits presenten les manifestacions càrstiques, especialment d'exocarst, més esplendoroses.

El Triàsic

Els dipòsits basals del Mesozoic presents a Mallorca corresponen al període Triàsic. El Triàsic està format (RODRÍGUEZ-PEREA *et al.*, 1987) per la característica tripleta de fàcies anomenades germàniques, encara que amb alguna influència alpina. La part basal, fàcies Buntsandstein, amb una potència superior als 400 m, està formada per argiles, gresos i conglomerats que representen un cicle de sedimentació fluvial amb episodis de tipus lacustre (CALAFAT, *et al.*, 1986/87). Els afloraments principals d'aquesta unitat es donen en el vessant NW del sector meridional de la Serra de Tramuntana, entre Estellencs i Banyalbufar. Per la seva composició siliciclàstica i la seva disposició al peu de la Serra de Tramuntana no tenen interès per a l'estudi del carst.

La part intermitja, fàcies Muschelkalk, aflora també a la costa d'Estellencs. Amb una potència aproximada de 260 m, correspon a dolomies amb laminacions algals, motlles d'evaporites i bretxes intraformacionals, que evolucionen a nivells amb

but also the presence of outcrops which can be mapped on the surface.

PALEOZOIC

The oldest materials outcropping in Mallorca are grey pelites interlayered with levels of quartz sands containing Crinoidae and pollen, which date these deposits as Carboniferous (RODRÍGUEZ-PEREA & RAMOS-GUERRERO, 1984). They show weak metamorphism and are also influenced by the hercinian orogenia which manifests an intense cleavage folding. Due to both its unique presence as small outcrops at Serra de Tramuntana and its siliciclastic composition, the Paleozoic lacks any interest for the study of karst in Mallorca.

MESOZOIC

The Mesozoic sequence deposits of Mallorca are over 1,500 m thick, the upper 1,000 m being mostly limestones. The Mesozoic materials constitute most of the outcrops of the structured zones: Serra de Tramuntana, Serres de Llevant and the small hills of El Pla of Mallorca. The abruptest relief of these sierras is composed of Jurassic limestones and dolomites and they happen to be the ones with the most spectacular karstic (especially exokarstic) features.

The Trias

*The basal Mesozoic deposits of Mallorca are Triassic in age. The Trias is formed by the characteristic germanic facies, although they show a slight alpine influence (RODRÍGUEZ-PEREA *et al.*, 1987). The basal Buntsandstein facies, over 400 m thick, is constituted by mudstones, sandstones and conglomerates, which represent a fluvial sedimentation cycle with lake episodes (CALAFAT *et al.*, 1986/87). The main outcrops of this unit occur on the NW slope of the southern part of Serra de Tramuntana, between Estellencs and Banyalbufar. Due to both their siliciclastic composition and their location at the foot of Serra de Tramuntana, they are of no interest for the study of karst.*

*The intermediate unit, the Muschelkalk facies, also outcrops on the coast of Estellencs. With an approximate thickness of 260 m, it corresponds to dolomites with algal and fenestral laminations and to intraformational breccias. Strata of red and yellow marls with marly and gypsiferous limestones are present on top, and above them limestones with fucoids are dominant (RODRÍGUEZ-PEREA *et al.*, 1987). Such a deposit corresponds to supra and intertidal environments, which show a short regressive episode marked by continental sediments but ending with a clear marine sedimentation of shallow internal platform. The high dolomitization together with the scarce surface of outcropping on the*

margues vermelles i grogues amb carniols, i al sostre acaben dominant les calcàries amb fucoids (RODRÍGUEZ-PÉREA *et al.*, 1987). El tipus de dipòsits presents marquen uns ambients de formació supra i intermareals a la base, amb un petit episodi regressiu marcat per sediments continentals però acabant amb una clara sedimentació marina de plataforma interna soma. El fort grau de dolomitització i l'escassa superfície d'aflorament en els pendents més forts del sector meridional de la Serra de Tramuntana tampoc fan del Triàsic mitjà un bon substrat per al desenvolupament de les morfologies càrstiques.

El Triàsic acaba a Mallorca amb la fàcies Keuper. Es tracta d'un conjunt molt variat que pot presentar potències de fins a 300 m amb una representació cartogràfica molt irregular, especialment a la Serra de Tramuntana, a causa dels efectes tectònics. Està format per sediments pel·lits, margues vermelles i grogues, amb importants intercal·lacions de nivells amb evaporites, guixos i anhidrites, i bancs de dolomies i carniols que es fan més importants cap al sostre de la sèrie triàsica, ja en el trànsit vers els dipòsits juràssics. Les roques volcàniques, en forma de colades basàltiques i dipòsits piroclàstics (cinerites), estan àmpliament representades. Presenten variacions volumètriques molt importants, essent aquest el fet més característic d'aquests nivells. La sedimentació del Keuper representa un esdeveniment regressiu important amb l'acumulació de dipòsits continentals i una forta activitat volcànica (ENRIQUE, 1986). Des del punt de vista carstològic, el Keuper tan sols presenta algunes morfologies de lapiaz en alguns afloraments puntuals de guixos, en canvi té una gran importància hidrològica ja que és el nivell impermeable per excel·lència.

En trànsit cap el Juràssic i sense una clara i important interrupció, els dipòsits d'edat retiana marquen l'inici de la sedimentació marina amb una seqüència d'aprofundiment progressiu que durarà tot el mesozoic. Amb una potència aproximada de 200 m consisteix bàsicament en dolomies, carniols i algunes intercal·lacions margoses; aflora bàsicament al llarg de la Serra de Tramuntana. En aquests materials es desenvolupen algunes cavitats càrstiques de notable profunditat.

El Juràssic

Els materials juràssics són els materials dominants a l'illa i conformen la major part dels dominis estructurats (Figura 3). Afloren al llarg de tota la Serra de Tramuntana i Serres de Llevant, així com en algunes elevacions de la zona del Pla. Formats per materials carbonatats, presenten unes potències al voltant dels 500 m. Representen una gran fase transgressiva en la qual queda reflectida l'evolució des d'una plataforma soma carbonatada al Lias, a dipòsits de marge continental i fàcies pelàgiques que per-

steepest slopes of the southern Serra de Tramuntana do not allow the Middle Trias to be a suitable substrate for the development of karstic features.

In Mallorca, the Trias ends with the Keuper facies. It consists of a very varied set, which thickness can reach over 300 m. This involves, due to the tectonics, a certainly irregular mapping, especially in Serra de Tramuntana. It is formed by pelitic sediments and red and yellowish marls interbedded with important levels of evaporites, gypsum and anhydrites, dolomite banks and marly gypsiferous limestones whose importance increases at the top of the Trias series, once within the limit of the Jurassic deposits. Volcanic rocks, such as basaltic flows and piroclastic deposits (cinerites), are widely represented. Their very important volumetric variations are the most characteristic aspect of these deposits. The Keuper sedimentation represents a relevant regressive event as it implies the accumulation of continental deposits and strong volcanic activity (ENRIQUE, 1986). From the karstic point of view, the Keuper just presents some karren features in definite gypsum outcrops; however, it is of great hydrological importance as it is the impermeable level par excellence.

Evolving gradually towards the Jurassic, in the absence of any clear or important interruption, the Rhaetian sediments point to the beginning of marine sedimentation with a progressive deepening which lasts through the whole Mesozoic. The Rhaetian shows a thickness of 200 m, being basically composed of dolomites and marly and gypsiferous limestones interbedded with marls. It mainly outcrops along the Serra de Tramuntana and implies several karstic cavities of notable depth.

The Jurassic

*The Jurassic materials are dominant in Mallorca, where they conform most of the structured terrains (Figure 3). They outcrop along both mountain ranges, Serra de Tramuntana and Serres de Llevant, and even in some of the hills in El Pla area. They consist of carbonate materials with a thickness up to 500 m. The Jurassic materials represent a great transgressive phase in which the evolution from a shallow carbonate platform (Lias) to continental margin deposits (Dogger and Malm) can be seen with a pelagic facies reaching the Lower Cretaceous period (COLOM, 1975; BARNOLAS, 1984; FORNÓS *et al.*, 1984 and 1986/87).*

Lower Jurassic rocks (Lias), which gradually grow from the Keuper, are formed of marly and gypsiferous limestones and dolomites which evolve towards breccias and massive micritic limestones. Thus, the base of the Lias is constituted by dark dolomites, breccias and marly and gypsiferous limestones. This unit has a massive appearance and its dolomites are frequently breccia-like. On top the



Figura 3:
Els dipòsits de calcàries i dolomies del Juràssic de Mallorca conformen la major part dels dominis estructurats de la Serra de Tramuntana (zona del Puig Major, Escorca).

Figure 3:
Limestone and dolomite deposits from the Jurassic of Mallorca form most of Serra de Tramuntana structured domains (Puig Major area, Escorca).

durarà fins el Cretaci (COLOM, 1975; BARNOLAS, 1984; FORNÓS *et al.*, 1984 i 1986/87).

El Juràssic inferior o Lias, amb un trànsit gradual des del Keuper, està format a la base per carniols i dolomies que evolucionen cap a bretxes i calcàries micrítiques massives. La base del Lias està constituïda per dolomies fosques, bretxes i carniols. És una unitat d'aspecte massiu en la qual les dolomies estan freqüentment bretxadades. Cap al sostre dominen les calcàries micrítiques, i de l'aspecte massiu es passa a uns nivells més estratificats, fent-se evident la presència dels components bioclàstics i oolítics. Per sobre d'aquests grans paquets carbonatats, hi ha uns petits nivells, molt variables, que poden arribar a tenir de 30 m a 40 m de potència i de distribució irregular, formats en un cas per margocalcàries amb abundant fauna nerítica i, en d'altres, per capes d'encrinites amb abundants belemnites. En ambdós casos la seqüència liàsica acaba amb nivells de quarsarenites i microconglomerats, també de distribució molt irregular (més importants a la Serra de Tramuntana) però que en cap cas superen els 10 m de potència. Estan formats per grans de quars ben arrodonits, de color vermellós i constitueixen un bon nivell guia a escala regional. Sobre aquesta unitat es disposa un sòl endurit (*hard ground*) format per costres d'òxids de ferro, de manganès, fosfats i estromatòlits pelàgics. Aquest sòl endurit marca la fi de la important sedimentació carbonatada de plataforma liàsica, amb la ruptura i enfonsament d'aquesta plataforma al Toarcià.

La major part dels fenòmens càrstics, tant d'endocòm d'exocarst, que s'observen a la Serra de Tramuntana afecten directament les calcàries del Lias. A les Serres de Llevant, on la composició del Lias és més dolomítica, el carst hi està menys desenvolupat.

El Juràssic mitjà, Dogger, està format a grans trets per calcàries noduloses i margocalcàries, que presenten variacions de potència molt importants, de 30 a 160 m. Aquesta unitat és molt rica en fauna d'ammonits i inclou diversos nivells considerats com a *Ammonitico Rosso* o fàcies de condensació. L'alternança rítmica de capes margoses i capes calcàries

micritic limestones are dominant and the massive appearance gives way to more stratified levels in which bioclastic and oolite limestone components certainly become obvious. Above these great limestone assemblages there are some short variable levels, 30 to 40 m thick and irregularly located, formed either by marly limestones containing plenty of neritic fauna or by encrinite layers with abundant belemnites. Both Lias series end with quartz sands and microconglomerates of irregular distribution, which are more relevant in Serra de Tramuntana, even though their thickness never exceeds 10 m. They are formed of rounded reddish quartz grains and they constitute a good key level at a regional scale. Over such a unit a hard ground formed by crusts of iron oxide, manganese and phosphates as well as by pelagic stromatolites can be observed. This hard ground marks the end of the important carbonate sedimentation of the Lias platform, as it breaks and deepens during the Toarcian.

Most of the karstic phenomena (both endo- and exokarstic) which can be observed in Serra de Tramuntana, directly affect the Lias limestones. In Serres de Llevant, with higher dolomitic contents, the karst is not so developed.

In short, the Middle Jurassic (Dogger) is composed of both nodular and marly limestones showing a wide range of thickness, from 30 to 160 m. This unit is very rich in ammonite fauna and it also includes a set of levels now considered as Ammonitico Rosso or condensation facies. Also frequent is a rhythmic alternation of marly and limestone layers, tens of meters in thickness, with abundant levels containing chert. In some cases, oolite and bioclastic lenticular limestones display themselves in sequences reaching thicknesses over 100 m. The set of Dogger deposits is considered as hemipelagites, showing some structural hills on top of which the Ammonitico Rosso facies develops and where the pelagic bottoms of turbiditic resedimented facies (oolite levels), coming from the platform, also evolve.

d'ordre decimètric amb abundants nivells amb sílex també hi és freqüent. De forma aïllada, i amb cossos que presenten geometries lenticulars, es disposen calcàries oolítiques i bioclàstiques distribuïdes de forma seqüencial amb potències que poden superar els 100 m. El conjunt dels dipòsits del Dogger representen una sedimentació de tipus hemipelàgic, amb alguns alts estructurals sobre els quals es desenvolupen les fàcies d'*Ammonitico Rosso*, i amb la presència en aquests fons pelàgics de fàcies ressedimentades (nivells oolítics) en forma turbidítica, procedents de la plataforma.

Els afloraments més importants del Dogger corresponen als nivells margosos, per la qual cosa els fenòmens càrstics hi són poc representats en aquests nivells.

El Juràssic superior, o Malm, representa a grans trets la continuació de la sedimentació de tipus pelàgic i hemipelàgic iniciada a la fi del Lias. En conjunt es tracta de fàcies de calcàries noduloses que intercal·len nivells de condensació tipus *Ammonitico Rosso*, amb margues radiolarítiques i calcàries silíciques finament laminades. Localment també hi són presents calcàries bioclàstiques i oolítiques ressedimentades. La potència del Malm, rarament supera els 200 m, essent en general més reduïda a la Serra de Tramuntana que a les Serres de Llevant. Els dipòsits del Malm, com els del Dogger, representen una clara sedimentació de marge continental.

A l'igual que al Dogger, l'alternança de nivells de poca potència de calcàries amb nivells margosos i margocalcaris, fa que en aquesta unitat les morfologies càrstiques no hi siguin molt abundants.

El Cretaci

El Cretaci és un període poc representat a Mallorca, encara que localment pot presentar potències importants (150 m). Els seus nivells inferiors afloren bàsicament al vessant sud-oriental de la Serra de Tramuntana i a les Serres de Llevant, mentre que els superiors, ho fan tan sols de forma que podríem dir testimonial a la Serra de Tramuntana, amb molt poc aflorament i volum de materials (COLOM, 1947 i 1975; MATAILLET & PECHOUX, 1978; SÀBAT, 1986).

La sedimentació de tipus pelàgic del Juràssic superior continua i s'incrementa durant el Cretaci inferior, amb la deposició d'importants gruixos de margues i margocalcaris blanques (*fàcies Maiòlica*) amb fauna de radiolaris i tintínids, que marquen una clara sedimentació pelàgica en un mar profund. Aquest tipus de sedimentació, però, esdevé cada cop més sòma i amb influències terrígenes.

CENOZOIC

El Cenozoic a Mallorca està àmpliament representat mostrant el seu conjunt una potència superior als 1.500 m (RAMOS-GUERRERO *et al.*, 1989). Pot

The most important Dogger outcrops are those of marly levels so that karstic phenomena are scarcely found.

The Upper Jurassic, or Malm, represents the continuation of the pelagic and hemipelagic sedimentation which started during the Upper Lias. As a whole, it consists of a set of nodular limestone facies interlayered with condensation levels of Ammonitico Rosso facies, and thinly laminated radiolarian marls and siliceous limestones. Locally, there are also resedimented bioclastic and oolite limestones. The Malm is usually under 200 m thick and tends to be shorter in Serra de Tramuntana than in Serres de Llevant. The Malm and Dogger deposits represent a continental margin sedimentation.

As happens with the Dogger, the alternation of thin limestone levels with marls and marly limestone result in few karstic features.

The Cretaceous

The Cretaceous is hardly represented in Mallorca, although it can reach a relevant thickness in some places (150 m). Its lower levels mainly outcrop on the Southeast slope of both Serra de Tramuntana and Serres de Llevant. However, its upper levels are scarcely present, small outcrops of low thickness appearing in Serra de Tramuntana (COLOM, 1947 and 1975; MATAILLET & PECHOUX, 1978; SÀBAT, 1986).

The pelagic sedimentation from the Upper Jurassic seems to continue and grow during the Lower Cretaceous with the great deposition of marls and white marly limestones (Maiolica facies) containing Radiolaria and Tintinnida, which evidence a deep sea pelagic sedimentation. Such a sedimentation became gradually shallower and more influenced by terrigenous materials.

CENOZOIC

*The Cenozoic is widely represented in Mallorca, having on the whole a thickness of over 1,500 m (RAMOS-GUERRERO *et al.*, 1989). Two great units can be distinguished: a pre- and syntectonic Cenozoic unit and a post-tectonic one. The first, covering the Middle Eocene to the Lower Miocene (Langhian), only outcrops in Serra de Tramuntana, Serres de Llevant and, occasionally, in the central area of the island. The second one, from the Middle Miocene to the present, occupies most of the depressed areas in the Pla de Mallorca, as well as those known as "Marines" in the Migjorn region of the island.*

The Paleogene

In Mallorca, as in the entire Balearic area, the Paleocene and the Lower Eocene are absent, as a consequence of both the emersion of the area which

ser dividit en dos grans unitats: un Cenozoic pre- i sintectònic i un postectònic. El primer, que abasta des de l'Eocè mitjà fins al Miocè inferior (Langhià), aflora només en la Serra de Tramuntana, Serres de Llevant i, puntualment, al centre de l'illa. El segon des del Miocè mitjà fins a l'actualitat ocupa la major part del Pla, les zones deprimides, així com les denominades "Marines" que conformen el Migjorn de Mallorca.

El Paleogen

A Mallorca, així com a la resta de l'àrea balear, no hi són presents ni el Paleocè ni l'Eocè inferior. Aquesta absència ha estat sempre relacionada amb l'emersió de l'àrea que actualment ocupa el Golf de València i les Balears. Els processos erosius que afectarien aquesta àrea emergida serien els responsables de l'escassa presència de dipòsits corresponents al Cretaci superior.

El primers materials d'edat paleògena afluïren a les Serres de Llevant i corresponen a l'Eocè mig i superior. Amb potències que escassament superen l'ordre decamètric, estan formats per calcarenites i margues riques en nummulites, que intercalen nivells de gresos i conglomerats poligènics amb còdols de materials juràssics i cretàcis, dipositats en un ambient litoral i de plataforma interna. A la Serra de Tramuntana aquests nivells estan formats per calcàries micrítiques marronoses, disposades en bancs tabulars, amb restes carbonoses, que corresponen a conques lacustres d'aigua dolça més o menys profundes (RAMOS-GUERRERO *et al.*, 1985).

L'Oligocè, amb una presència més important que l'Eocè, és una unitat clarament detrítica de caràcter continental. A les Serres de Llevant, està formada per gresos massius amb intercalacions de llims i argiles vermelles amb potències que localment poden superar els 100 m. A la Serra de Tramuntana, dominen els conglomerats poligènics disposats en cossos lenticulars, que inclouen nivells llimosos i petits bancs carbonatats amb nombroses concrecions algals. El conjunt, que pot superar els 150 m de potència, representa una sedimentació de tipus fluvial amb episodis de tipus palustre.

La presència de fenòmens càrstics en els materials paleògens és de poca importància.

El Neogen

El Neogen està format pràcticament en la seva totalitat per dipòsits de tipus carbonat i el seu conjunt suposa una potència de més de 1.500 m. La part basal del Miocè, amb presència molt irregular i amb importants variacions de potència que poden arribar als 70 m, està formada per conglomerats amb matriu calcarenítica i calcàries bioclàstiques i esculloses (RODRÍGUEZ-PÉREA, 1983). Aquests nivells reomplen un substrat irregular i representen una sedimentació litoral dins d'una paleogeografia complexa. En trànsit cap al Miocè mig, una important gruixa de mar-

is at present occupied by the Valencian Trough and the Balearic Islands, and the former erosion processes which affected those Upper Cretaceous deposits.

*The first outcropping materials from the Paleogene are located in Serres de Llevant and are of Middle and Upper Eocene age. Their thickness is often not over a few tens of meters. They are formed by calcarenites and marls rich in nummulites, interbedded with sandstone levels and polygenic conglomerates containing pebbles from the Jurassic and the Cretaceous which settled within a littoral environment. In Serra de Tramuntana those levels consist of brownish micritic limestones displayed in tabular banks, interlayered with carbonaceous remainings related to more or less deep fresh water lake basins (RAMOS-GUERRERO *et al.*, 1985).*

The Oligocene, more important than the Eocene, is undoubtedly a continental detritic unit. In Serres de Llevant it consists of massive sandstones, silts and reddish clays and its thickness sometimes exceeds 100 m. In Serra de Tramuntana the polygenic conglomerates displayed as lenticular beds are dominant, and include siltstones and limestones with algal concretions. Such a set, which can exceed 150 m thick, represents fluvial sedimentation and swamp deposits.

The presence of karstic phenomena on the Paleogene materials is almost non-existent.

The Neogene

The Neogene is composed mostly of carbonate deposits and as a whole it comprises a thickness of over 1,500 m. The Lower Miocene, whose presence and thickness (occasionally reaching 70 m) are rather irregular, is formed of conglomerates with a calcarenitic matrix and bioclastic and reefal limestones (RODRÍGUEZ-PÉREA, 1983). These levels cover an irregular substrate and represent a littoral sedimentation immersed in a complex paleogeography. Moving gradually towards the Middle Miocene there appears a great thickness of marls and calcarenites, occasionally up to 500 m, both interlayered with siliceous levels and abundant delapsional deposits, olistoliths, slumps, etc., which correspond to turbidite deposits (RODRÍGUEZ-PÉREA, 1983). Such a set represents the deepening basin, thus having a typical slope and continental rise sedimentation which coincide with the main Alpine structuration of Mallorca. These turbidite units end with a shallow carbonate sequence of bioclastic limestones which outcrop almost exclusively in the central hills of El Pla area, although they can reach a thickness of around 150 m.

The Lower Miocene deposits, together with the Lias limestones, contain the most spectacular exokarstic features, the most remarkable being the karren landscapes of the central Serra de

gues i gresos carbonatats que pot ser de fins a 500 m, amb nivells de silixites i abundants dipòsits de tipus delapsional, olistòlits, *slumps*, etc., interpretats com a dipòsits turbidítics (RODRÍGUEZ-PEREA, 1983), representen l'aprofundiment de la conca, o subconques, amb una típica sedimentació de talús i peu de talús, que coincideix amb la principal fase d'estructuració alpina de Mallorca. Aquesta unitat turbidítica acaba amb una seqüència carbonatada someritzant, formada per calcàries bioclàstiques, que afloren pràcticament només a les elevacions centrals del Pla però poden atènyer potències al voltant dels 150 m.

Els dipòsits del Miocè inferior, juntament amb les calcàries del Lias, són els que mostren les morfologies exocàrstiques més espectaculars, de les quals destaquen els paisatges de lapiaz de la zona central de la Serra de Tramuntana. La composició juràssica de la major part dels còdols que formen els conglomerats del Miocè inferior, així com l'elevat grau de cimentació, fa que tinguin un comportament similar davant els fenòmens de tipus càrstic i que, per tant, en el paisatge siguin difícils de diferenciar uns nivells dels altres.

El Miocè mig enregistra les darreres etapes de l'estructuració, amb la deposició de seqüències clarament regressives, de tipus lacustre i palustre, amb la deposició de margues amb guixos, nivells de carbó i l·lencions de calcàries amb sílex, que només afloren parcialment de forma dispersa a la zona del Pla de Mallorca amb potències molt irregulars d'ordre hectomètric (RAMOS-GUERRERO *et al.*, 1994).

Els dipòsits del Miocè superior, juntament als del Lias, suposen l'altre volum important pel que fa a afloraments a l'illa de Mallorca. El Miocè superior, format per dipòsits carbonatats, reomple les zones que envolten les àrees estructurades: les zones denominades Marines (POMAR *et al.*, 1992). Es tracta de dipòsits tabulars, formats per una alternança de calcarenites i calcisiltites a la base, que evolucionen a calcàries esculloses massives i calcarenites, i que acaben amb calcarenites i calcàries oolítiques en el denominat "Complex Terminal" (FORNÓS & POMAR, 1983). Amb potències globals que poden superar els 300 m, formen els penya-segats costaners de la zona meridional i oriental de l'illa. Aquests nivells representen una sedimentació carbonatada de plataforma, amb el creixement d'importants masses d'esculls de coralls, i amb la presència de planes arenoses molt somes amb estromatòlits i afectats per una forta dinàmica marina.

Per la seva gran potència i quantitat d'aflorament, aquestes calcàries mostren diversos fenòmens càrstics. Donada la localització a la línia de costa (Figura 4) destaca especialment el lapiaz litoral, i una gran abundància de coves i cavitats en les quals són presents els processos que interrelacionen la dinàmica càrstica i la marina, incloent-hi tots els fenòmens relacionats amb les oscil·lacions del nivell de la mar durant el Quaternari. Un exemple de tota aquesta dinàmica són, entre moltes d'altres, les famoses

Tramuntana. The Jurassic composition of most of the pebbles which compose the Miocene conglomerates, as well as the high cementation rate, encourage all of them to show a similar behaviour regarding the karstic phenomena, so that it becomes a difficult task to differentiate the different levels.

The Middle Miocene records the latter phases of structuration through the deposition of clearly regressive sequences. These sequences —characterized by lacustrine and palustrine deposition of marls and gypsums, coal levels and cherty limestone bodies— outcrop, partially and dispersely, in the area of El Pla de Mallorca, where their thickness, of a hectometric scale, is quite irregular (RAMOS-GUERRERO *et al.*, 1994).

The Upper Miocene, as well as the Lias deposits, are the most important limestone outcrops of Mallorca. The Upper Miocene, composed by limestones and calcarenites, forms the areas surrounding the structuration zones: the so-called "Marines" (POMAR *et al.*, 1992). These are tabular deposits consisting of alternating calcarenites and calcisiltites at the base evolving towards massive reefal limestones and calcarenites, and ending with oolite limestones and calcarenites in the unit designated as "Terminal Complex" (FORNÓS & POMAR, 1983). Their thickness, occasionally exceeding 300 m, forms the coastal cliffs of the South and East of the island. These levels represent a carbonate platform sedimentation where relevant coral reefs growth and where sand shoals containing stromatolites can be found, showing a strong marine dynamics.

Due to their great thickness and extended outcrops, these limestones present diverse karstic phenomena. Due to their alignment with the sea shore (Figure 4) the littoral karren is remarkable, with great abundance of caves and cavities where processes linking the karstic and marine dynamics



Figura 4: Afloraments de calcarenites pertanyents al Miocè superior al litoral oriental de Mallorca.

Figure 4: Calcarenites outcrops, Upper Miocene in age, on the eastern littoral of Mallorca.

Coves del Drac al llevant mallorquí. Aquestes calcàries estan afectades endemés per nombrosos processos paleocàrstics que han actuat des del Miocè superior fins a l'actualitat.

El Pliocè, encara que amb una important potència, més de 200 m (COLOM, 1985; SIMA & RAMÓN, 1986), pràcticament no aflora. Pot observar-se bé només en sondatges, essent present a les parts més deprimides del Pla, Conca de Palma i Conca d'Inca - Sa Pobla. Format per calcisiltites ocre a la base, al sostre evoluciona cap a calcarenites, que s'interdigen lateralment a nivells detrítics formats bàsicament per conglomerats. El conjunt correspon al reblliment de les zones més deprimides localitzades al peu de les serres, amb una sedimentació típicament de badia, litoral i amb la presència de cossos deltaics que acumulen els materials procedents de l'erosió de les serres. Des del punt de vista càrstic, a causa de la falta d'aflorament, no presenten morfologies de lapiaz i només s'hi han localitzat petites cavitats sense gaire importància.

Els dipòsits plio-quaternaris i quaternaris (BUTZER & CUERDA, 1962; CUERDA, 1975) consisteixen bàsicament en calcarenites, que corresponen a diversos episodis dunars relacionats amb els episodis glacials pleistocens, i a fàcies detrítics conglomeràtiques d'origen al·luvial i procedents del desmantellament de les serres, especialment de la Serra de Tramuntana.

are common, including those related to the sea level changes of the Quaternary. The famous Coves del Drac, on the eastern coast of Mallorca are, among others, a good example of such dynamics. These limestones are also affected by paleokarstic phenomena which have been present from the Upper Miocene to the present.

Despite its important thickness of over 200 m (COLOM, 1985; SIMA & RAMÓN, 1986), the Pliocene hardly outcrops. It can be only observed through drillings made in the lowest areas of El Pla, the Conca de Palma and the Conca d'Inca - Sa Pobla. The Pliocene base consists of yellowish calcisiltites evolving at the top into calcarenites, which are laterally interbedded with detritic levels mostly formed by conglomerates. This set corresponds to the filling-up of the most depressed zones at the foot of the ranges, where there is a typical bay, littoral and deltaic sedimentation which accumulates materials resulting from the denudation of the mountains. Due to scarce outcropping, the Pliocene does not show karren features from the karstic point of view, so that just small unimportant cavities can be found along its domains.

The Plio-Quaternary and Quaternary deposits (BUTZER & CUERDA, 1962; CUERDA, 1975) are basically calcarenitic, and they coincide both with dune episodes related to Pleistocene glacial events and with conglomerate facies of alluvial origin coming from the denudation of the mountain ranges, especially from Serra de Tramuntana.

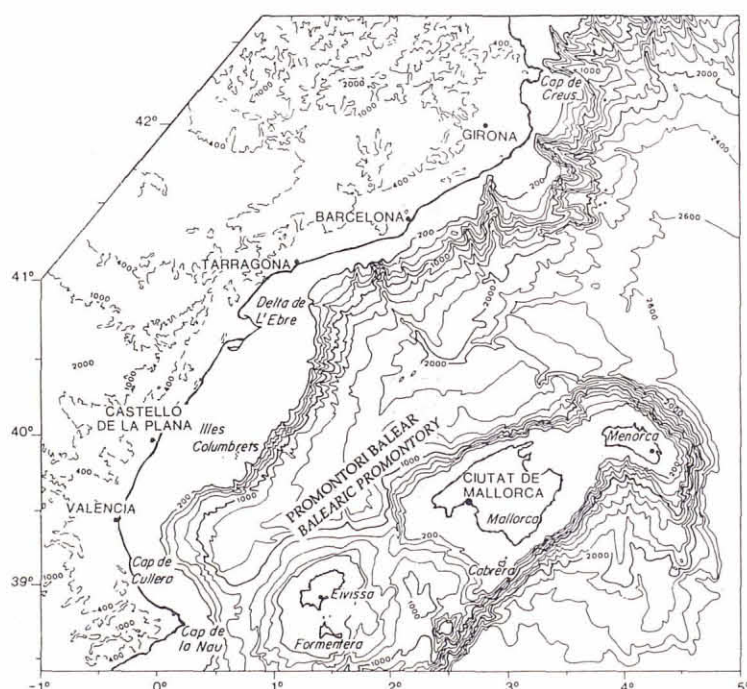


Figura 5:
Mapa fisiogràfic de la Conca Catalano-Balear (ROCA, 1992; simplificat de CANALS et al., 1982).

Figure 5:
Physiographic map of the Catalan-Balear basin (ROCA, 1992; simplified from CANALS et al., 1982).

Marc tectònic i geològic

Mallorca constitueix l'enclau emergit més extens del Promontori Balear (Figura 5), el qual correspon a un relleu, en gran part submarí, que s'estén des del Cap de la Nau, a Alacant, fins al NE de Menorca. El Promontori presenta una orientació SW-NE i correspon a la prolongació cap al NE de les estructures de les Bètiques externes, o de les parts més septentrionals de les internes.

El Promontori Balear té una longitud de 440 km i es troba limitat per grans espadats i pendents molt forts que defineixen uns límits molt nets amb els fons submarins adjacents: la conca Algeriana a l'E i SE i la conca Catalano-Balear a l'W i NW, les quals individualitzen les Balears d'Àfrica i Ibèria, respectivament.

L'illa de Mallorca constitueix un segment del cinturó de plects i encavalcaments producte de la col·lisió continental entre la placa ibèrica i l'africana. La col·lisió, que ocorregué des del Cretaci superior (aprox. 84 Ma) fins al Miocè mig (15 Ma), afectà les Bètiques i les Balears i fou deguda al gir antihorari d'Àfrica i Aràbia com a resposta a l'obertura de l'Atlàntic sud (OLIVET *et al.*, 1984; entre d'altres).

Tectonic and geological framework

Mallorca is the most extended emerged sector of the Balearic Promontory (Figure 5) which is a mostly submarine relief extending from Cap de la Nau (Alacant) to the NE of Menorca. This relief is aligned from SW to NE and represents the extension of the external and the northern internal Betic range towards the NE.

The Balearic Promontory is 440 km long and is limited by steep slopes which clearly separate it from the adjacent deep seas: the Algerian basin in the East and Southeast and the Catalan-Balearic basin in the West and Northwest, which isolate the Balearic Islands from Africa and Iberia respectively.

Mallorca is part of the folded and thrust belt resulting from the continental collision between the African and the Iberian plates. Such a collision took place from the Upper Cretaceous (approx. 84 Ma) to the Middle Miocene (15 Ma) and had an effect on the Betics and the Balearics. It was caused by the anticlockwise rotation of Africa and Arabia as a response to the South Atlantic opening (OLIVET *et al.*, 1984; among others).

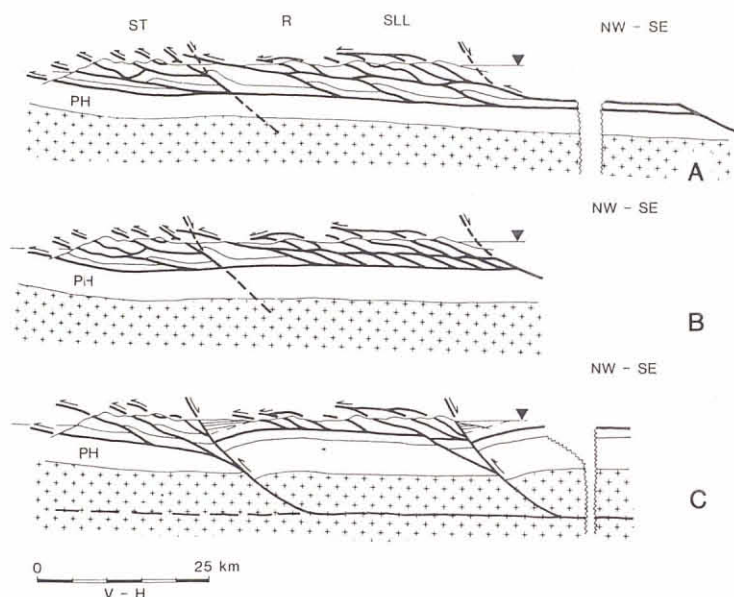


Figura 6: Esquema de l'estructura en profunditat de l'illa de Mallorca (RAMOS-GUERRERO *et al.*, 1989).

A, B i C representen hipòtesis diferents de l'estructura en profunditat a Mallorca. En A i B, Randa i Serres de Llevant encavalquen la Serra de Tramuntana. Només un encavalcament tardà ha estat representat i les falles normals posteriors es mostren en la seva posició inicial. En B, el "duplex" inferior de les Serres de Llevant involucra únicament materials del Triàsic. C mostra el resultat de

Figure 6:

Deep structure outline from Mallorca Island (RAMOS-GUERRERO *et al.*, 1989).

A, B and C represent different hypothesis about the deep structure of Mallorca. In A and B, Randa and Serres de Llevant are thrusting the Serra de Tramuntana. Only one latter thrust has been represented, and the back normal faults are shown at their initial position. In B, the lower "duplex" of Serres de Llevant only involves Triassic materials. C shows the results of the extensional faults from the Mesozoic. Afterwards, normal faults undergo, again, a normal movement, so forming semigrabens which are filled with post-orogenic materials.

Crosses pattern, crystalline basement; PH, pre-Hercinian Paleozoic rocks with low metamorphic grade; dotted pattern, Permian and Triassic; white, Mesozoic and Cenozoic; ST, Serra de Tramuntana; R, Randa; SLL, Serres de Llevant.

les falles extensionals del Mesozoic. Més tard, les falles normals experimenten un altre cop moviment normal, formant semigrabens, reomplerts per materials post-orogènics.

Trama de creus, basament cristal·lí; PH, roques Paleozoiques pre-hercinianes de baix grau metamòrfic; trama de punts, Pèrmic i Triàsic; blanc, Mesozoic i Cenozoic. ST, Serra de Tramuntana; R, Randa; SLL, Serres de Llevant.

Tot i la importància dels esdeveniments esmentats, l'arquitectura geològica de l'illa de Mallorca tal com la veiem ara, és el producte d'una evolució com-

In spite of the relevance of the events mentioned above, the present geological architecture of Mallorca is the result of a complex evolution involving some

plexa que engloba etapes prèvies a la col·lisió (mesozoiques bàsicament), l'estructuració durant la col·lisió continental i, finalment, els processos extensionals neògens i quaternaris superposats a tots els anteriors (Figura 6).

A Mallorca es diferencien tres grans unitats geomorfològiques i estructurals: la Serra de Tramuntana, el Pla i les Serres de Llevant (Figura 1). La morfologia actual de l'illa de Mallorca s'explica com el resultat, principalment, del moviment normal, durant el Miocè mitjà-Quaternari, d'un conjunt de falles NE-SW que originen la compartimentació de l'illa en un conjunt de *horsts* i *grabens* i que es corresponen respectivament amb les serres i planes de la present morfologia de l'illa. De totes maneres, la delimitació entre serres i planes no és sempre clara: freqüentment es delimiten per fractures d'edat terciària, però en d'altres casos els seus límits corresponen a discordàncies angulars en les quals els dipòsits terciaris i quaternaris fossilitzen estructures produïdes durant el Mesozoic (falles normals) o el Cenozoic inferior (bàsicament, encavalcaments).

LA SERRA DE TRAMUNTANA

Aliniada de NE a SW, amb una longitud d'uns 90 km i una amplada mitjana de 15 km, la Serra de Tramuntana constitueix la cadena muntanyosa més important de l'illa de Mallorca. La seva estructura es caracteritza per la presència d'un seguit de plec, falles i encavalcaments (Figura 7) que s'han ordenat tradicionalment en tres grans unitats encavalcants (FALLOT, 1922). Per bé que localment s'orienten també N-S, totes aquestes estructures d'edat oligoceno terminal-miocena mitjana presenten, en general, una orientació predominant NE-SW.

periods (mainly Mesozoic ones) previous to the collision, such as the structuration during the continental collision and also the extensional processes from the Neogen and Quaternary which overimposed on the former (Figure 6).

In Mallorca three great geomorphological and structural units can be differentiated: Serra de Tramuntana, El Pla and Serres de Llevant (Figure 1). The present morphology of Mallorca can be explained as mainly the result of the normal movement, during the Middle Miocene-Quaternary, of a series of NE-SW faults which gave way to the set of horsts and grabens corresponding respectively to the ranges and plains found at the present on the island. However, the differentiation between ranges and plains is not always so clear: they are frequently limited by Tertiary fractures but occasionally their limits are angular discordances in which the deposits from the Tertiary and Quaternary fossilize structures produced during the Mesozoic (normal faults) or in the Lower Cenozoic (mainly thrusts).

SERRA DE TRAMUNTANA

It is aligned in a NE-SW direction, being 90 km long and 15 km wide on average. The Serra de Tramuntana is the most important mountain range on Mallorca. Its structure is characterized by a set of folds, faults and thrust sheets (Figure 7) which have been traditionally described as three big structural units (FALLOT, 1922). Although they are locally oriented from N to S, all these terminal Oligocene-Middle Miocene aged structures are also predominantly aligned from NE to SW.

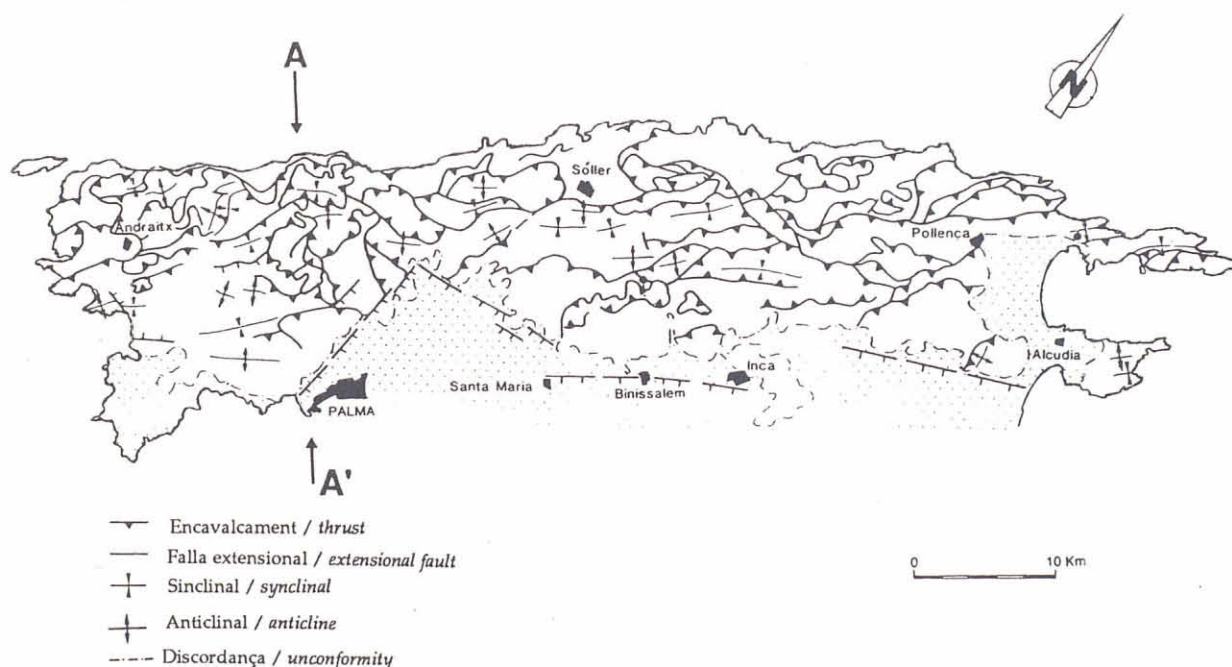


Figura 7: Mapa estructural de la Serra de Tramuntana (GELABERT *et al.*, 1992).

Figure 7: Structural map of Serra de Tramuntana (GELABERT *et al.*, 1992).

Dintre de les estructures contractives, les més prominents i ben desenvolupades són els encavalcaments, els quals es presenten generalment inclinats cap al SE o subhorizontals. A diferència de la resta de l'illa, aquests encavalcaments involucren, a més de la cobertura juràssico-miocena, materials del Triàssic inferior (Buntsandstein i Muschelkalk) i fins i tot de la part superior del sòcol hercinià.

D'altra banda, el sistema d'encavalcaments mostra, sobretot a les àrees centrals i nord-orientals, una clara disposició imbricada cap al NW, amb el nivell de desenganxament situat a les argiles del Keuper. A la zona meridional, si bé aquesta disposició és encara la predominant, s'observen també en el sistema d'encavalcaments imbricacions dirigides cap a l'E i l'W. Els sistemes imbricats s'agrupen en un conjunt de grans unitats encavalcants que equivalen a les unitats I, II i III definides per FALLOT (1922), encara vàlides.

La disposició espacial de les rampes associades als encavalcaments (dirigides principalment cap al NW), l'orientació dels plecs i la direcció NW-SE de les falles direccionals desenvolupades sincrònicament amb els encavalcaments, indiquen que la direcció de transport de les unitats encavalcants de la Serra de Tramuntana va ser cap al NW (FALLOT, 1922; POMAR *et al.*, 1983; GELABERT *et al.*, 1992). Segons aquesta direcció de transport, les estructures orientades N-S, serien, tal com proposen ROCA & VERGÉS (1989) rampes laterals.

Els diversos talls compensats realitzats perpendicularment a la Serra de Tramuntana (Figura 8) mostren que l'escurçament general pels encavalcaments i plecs oligoceno terminals-miocens mitjans és d'un 55-56% (ÁLVARO, 1987; GELABERT *et al.*, 1992), que correspon a uns 20-21 km.

Among the compressional features the thrusts are the most prominent and well-developed, appearing to be dipping towards the SE or subhorizontally. Contrary to what occurs on the rest of the island, these thrusts imply, apart from the Jurassic-Miocene setting, some Lower Triassic materials (Buntsandstein and Muschelkalk) and even traces of the upper Hercinian basement.

Moreover, the thrusting system shows, mainly in the centre and Northeast, a certain disposition towards the NW with the decollement level located within the Keuper clays. On the South, although such a setting is still predominant, some alignments towards the E and the W within the thrust system can also be observed. These systems are assembled in a set of great structural units which are equivalent to the still valid units I, II and III of FALLOT (1922).

The spatial disposition of the ramps (mainly oriented towards the NW) in relation to the thrust sheets, as well as the orientation of the folds and the directional NW-SE faults which developed synchronously with the thrustings, point out a NW direction of transport of the structural units on Serra de Tramuntana (FALLOT, 1922; POMAR *et al.*, 1983; GELABERT *et al.*, 1992). According to this transport direction those structures oriented from N to S would be lateral ramps, as suggested by ROCA and VERGÉS (1989).

Several balanced cross-sections perpendicularly to Serra de Tramuntana (Figure 8) show a general shortening of 55-56% due to terminal Oligocene-Middle Miocene thrusts and folds (ÁLVARO, 1987; GELABERT *et al.*, 1992), which corresponds to ca. 20-21 km.

The most remarkable morphological aspect of Serra de Tramuntana is the different relief between

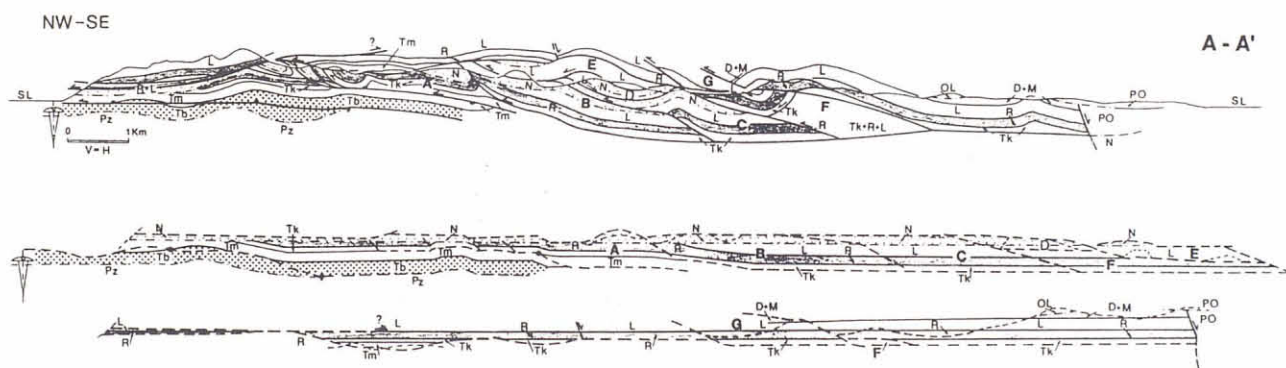


Figura 8: Tall geològic de la part sud-occidental de la Serra de Tramuntana (GELABERT *et al.*, 1992). Situació del tall en el mapa de la Figura 5. A, B, C, D, E, F i G corresponen a làmines d'encavalcament que s'han representat en la secció deformada i indeformada. Pz- Paleozoic; Tb- Buntsandstein; Tm- Muschelkalk; Tk- Keuper; R- Retià; L- Juràssic inferior; D- Juràssic mitjà; M- Juràssic superior; K- Cretaci; Ol- Oligocè; N- Miocè inferior-mitjà.

Figure 8: Cross-section of the southwestern area of Serra de Tramuntana (GELABERT *et al.*, 1992). Location of the cross-section on the map from Figure 5. A, B, C, D, E, F and G correspond to thrust sheets which have been represented in both their deformed and their original position. Pz- Paleozoic; Tb- Buntsandstein; Tm- Muschelkalk; Tk- Keuper; R- Rhaetian; L- Lower Jurassic; D- Middle Jurassic; M- Upper Jurassic; K- Cretaceous; Ol- Oligocene; N- Middle-Lower Miocene.

El caràcter morfològic més destacable de la Serra de Tramuntana és la diferència de relleu entre el vessant marí i el sud-oriental. Aquesta diferència està condicionada per la disposició estructural dels materials, inclinats cap al SE, i també per una major maduresa en el modelat del relleu. Així, mentre el vessant marí presenta un relleu juvenil, amb processos erosius intensos i una inestabilitat gravitacional important, que es manifesta en freqüents esllavissaments, el vessant meridional presenta una morfologia més arrodonida ja que la maduresa del relleu fou adquirida ja durant el Neogen superior. El recent reconeixement i la datació de dipòsits fossilífers, a distintes coves, proven que durant el Pliocè gran part del sistema càrstic presentava condicions senils o madures.

La maduresa del sistema càrstic al Pliocè fou deguda en gran part al fet que el Paleocè i l'Eocè inferior foren períodes caracteritzats per una àmplia regressió que culminà amb l'emersió i erosió de grans àrees de la plataforma mesozoica. D'aquesta manera, la cobertura margosa i margocalcària Juràssico-superior-Cretàcica de les potents masses de calcàries del Lias, ja havia desaparegut abans de produir-se l'orogènia oligo-miocena a Mallorca. Així el modelatge càrstic es va poder iniciar damunt de les calcàries liàsiques amb posterioritat immediata a l'aixecament de la Serra de Tramuntana.

EL PLA

Comprèn una ampla zona situada entre la Serra de Tramuntana i les Serres de Llevant, dintre de la qual es poden diferenciar diversos dominis geomorfològics (Figura 1): els plans de Palma, Inca, sa Pobla, Campos i Manacor, els seus relleus centrals emmarcats entre les poblacions de Sineu-Petra-Porreres-Llucmajor, entre els quals destaca el massís de Randa, i la plataforma carbonatada miocena del Migjorn, afectada de manera notable per fenòmens càrstics, i que abarca des de l'extrem oriental de la badia de Palma fins a la part central de la costa oriental (Portocristo).

Les planes corresponen a depressions amb subsidència activa durant el Neogen superior (a partir del Serravalià) i Quaternari. Els seus límits vénen donats per falles normals d'edat post-Langhià. Els relleus centrals estan formats per materials del mesozoic i del cenozoic inferior. A Randa (Figura 9) s'han definit dues unitats estructurals: la inferior, formada per Mesozoic i Miocè inferior i mig, i la superior, formada per diverses làmines encavalcants de materials paleògens (ANGLADA, 1985). La muntanya de Randa, visible des de gran part del centre de Mallorca, forma part de la unitat inferior i aflora en finestra tectònica. L'estructura dels relleus centrals restants presenta característiques semblants a les descrites per a l'àrea de Randa.

the coastal (NW) and the SE slopes. Such a distinction is conditioned by both the structural disposition of the materials, all dipping SE, and by a higher maturity of the relief modelling. Consequently, while the coastal slope presents juvenile relief, undergoing intense erosive processes and having an important gravitational instability which is revealed by frequent rockslides, the southern slope shows a more rounded morphology, as the relief had already matured during the Upper Neogene. Recent observations and datings on fossiliferous deposits from diverse caves have demonstrated that during the Pliocene most of the karstic system was senile or mature.

The maturity of the Pliocene karstic system was mainly due to the wide regression characterizing the Paleocene and the Lower Eocene, which reached its climax with the emersion and erosion of extensive areas of the Mesozoic platform. Hence, the Upper Jurassic-Cretaceous marl and marly calcareous covering present within the huge limestone assemblages from the Lias had already disappeared before the Oligo-Miocene orogeny took place in Mallorca.

EL PLA

It comprises the extensive area between Serra de Tramuntana and Serres de Llevant. Various geomorphological domains can be distinguished within, i.e. (Figure 1): the plain covering Palma, Inca, Sa Pobla, Campos and Manacor; the smooth central relief located between the villages of Sineu, Petra, Porreres and Llucmajor, where the most remarkable orogenic feature is the Massís de Randa; and the Miocene carbonate platform of the Migjorn, heavily affected by karstic phenomena, and extending from the eastern edge of Palma bay to the central part of the eastern coast (Portocristo).

These plains correspond to depressions which underwent active subsidence during the Upper Neogene (starting in the Serravalian) and the Quaternary. Their limits are normal faults of post-Langhian age. The central reliefs consist of Mesozoic and Lower Cenozoic materials. In Randa (Figure 9) two structural units have been defined: the lower one, formed by the Mesozoic and the Lower and Middle Miocene, and the upper one, composed by various thrust sheets of Paleogene materials (ANGLADA, 1985). The mountain of Randa, which can be seen from almost any point in the central part of Mallorca, is part of the lower unit and it outcrops in a tectonic window. The other central relief shows a structure with similar characteristics to those described for Randa.

The Miocene carbonate platform of the Migjorn is a great tabular area. It is a set formed by the progradation of the Reefal Unit (Upper Miocene), on

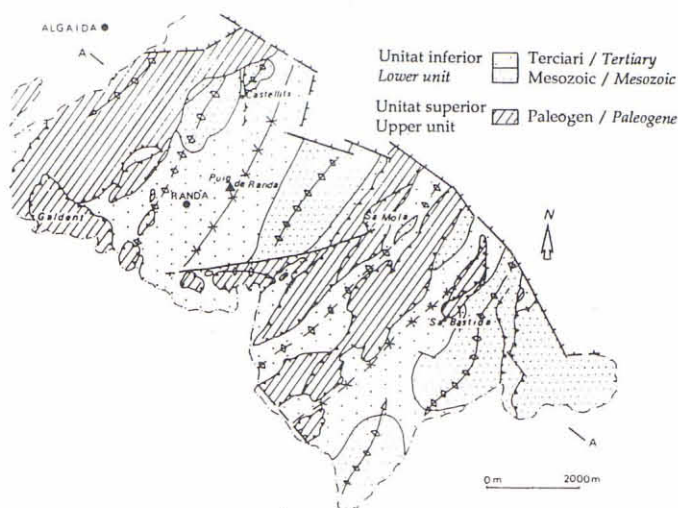


Figura 9:
Mapa estructural i tall geològic de la regió de Randa (ANGLADA, 1985).

Figure 9:
Structural map and cross-section of the Randa area (ANGLADA, 1985).

La plataforma carbonatada miocena del Migjorn correspon a una àrea tabular. Es tracta d'un conjunt format per la progradació de la Unitat Escullosa (Miocè superior), damunt de la qual es situen dipòsits també tabulars de les Calcàries de Santanyí ("Complex Terminal") i de les eolianites Plio-Quaternàries. L'aixecament dels relleus de les Serres de Llevant i de la zona central, als quals recobreixen de manera discordant, va produir el seu límit actual terra endins, mentre que la morfologia de la costa respon, en bona mesura, a les falles normals recents que els delimiten.

LES SERRES DE LLEVANT

La característica més destacada de l'estructura de les Serres de Llevant és la presència d'encavalcaments i plecs que presenten dues direccions ortogonals: NE-SW i NW-SE (DARDER, 1925; ESCANDELL & COLOM, 1960; SÀBAT, 1986). Les relacions d'aquestes estructures amb els dipòsits terciaris mostren que tant les NE-SW com les NW-SE es formaren durant un lapse de temps que abarca des de l'Oligocè fins al Miocè mig (SÀBAT, 1986).

Segons SÀBAT (1986) l'estructura fonamental consisteix en un sistema d'encavalcaments que defineixen set unitats encavalcants imbricades (Figura 10), de manera que les unitats superiors es situen progressivament tant cap al SE com cap al SW. La relació entre l'estratificació i les superfícies d'encavalcament permet d'interpretar nombroses rampes i plecs associats a elles. Aquestes estructures presenten totes les orientacions descrites anteriorment i les relacions geomètriques entre elles, així com les seves edats deduïdes a partir de criteris estratigràfics, mostren la seva sincronia. El conjunt de les direccions estratigràfiques ascendents en les zones de rampa varia des del NE fins al SW, passant pel NW.

top of which there are also tabular deposits of "Santanyí Limestones" (Terminal Complex) and Plio-Quaternary eolianites. The reliefs of Serres de Llevant and the central area, to which the Terminal Complex onlaps, produced their present inland limit while the coastal morphology is mostly constituted by the recent normal faults which delimit them.

SERRES DE LLEVANT

The most outstanding characteristic of Serres de Llevant is the presence of thrusts and folds in two orthogonal directions: NE-SW and NW-SE (DARDER, 1925; ESCANDELL & COLOM, 1960; SÀBAT, 1986). The relationships between these structures and the Tertiary deposits show that both the NE-SW and the SW-NE were formed between the Oligocene and the Middle Miocene (SÀBAT, 1986).

According to SÀBAT (1986), the main structure consists of seven imbricated thrusting units (Figure 10) so that the upper ones are progressively located towards the SE as well as towards the SW. The relationship between unit boundaries and thrust surfaces enables the interpretation of ramps and folds associated with them. Such structures show every direction described above and the geometrical links among them as well as their ages (deduced from stratigraphic criteria) are evidence of their synchrony. In those zones where ramps are present, ascending stratigraphic directions span from NE to SW, including NW.

Considering the synchrony of the thrusts and folds in different directions and also the polarity of the ramps, the thrust sheet assemblages and their associated structures could be integrated into a unique system whose transport direction would be towards the NW. According to this model, NW-SE

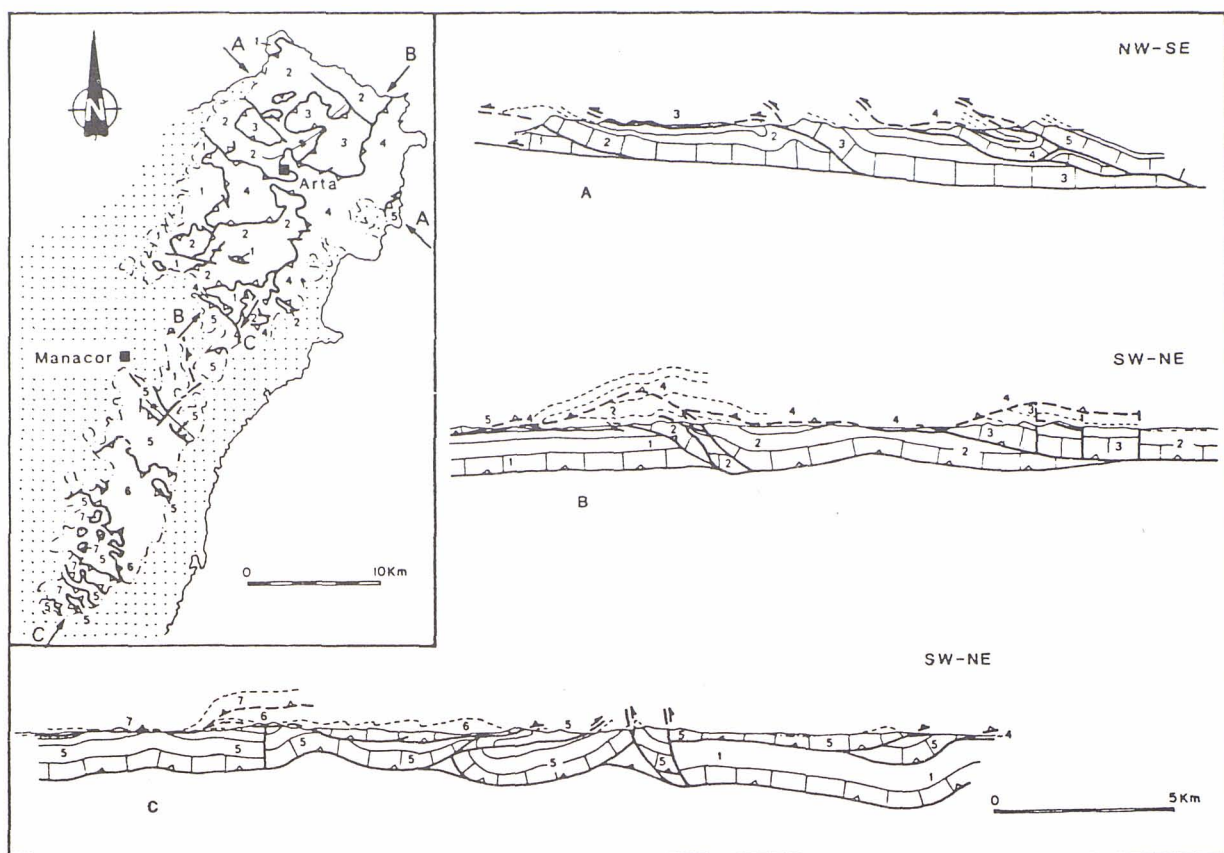


Figura 10: Esquema estructural i talls geològics de les Serres de Llevant (SÀBAT, 1986).

Figure 10: Structural outline and cross-sections of Serres de Llevant (SÀBAT, 1986).

Tenint en compte la sincronia dels encavalcaments i plects de les distintes direccions i la polaritat de les rampes, el conjunt d'encavalcaments i estructures associades poden integrar-se en un únic sistema, la direcció de transport del qual és cap al NW. En aquest model, les rampes NW-SE observades, tant amb polaritat cap al NE com cap al SW, corresponen a rampes laterals o lleugerament obliqües, les quals provoquen l'atasconament lateral de les unitats encavalcants i eventualment la seva desaparició.

La realització de talls compensats (SÀBAT, 1986) ha permès d'avaluar un escurçament d'uns 25 km, paral·lelament a la direcció de transport en la transversal d'Artà. L'existència de rampes lleugerament obliqües ha donat escurçaments aproximadament perpendiculars a la direcció de transport, que es resolen en plects concentrats al S de Manacor.

Els relleus de les Serres de Llevant presenten, predominantment, pendents suaus i formes arrodonides. Aquest fet ha de relacionar-se amb fases d'erosió que ja havien aconseguit la seva maduresa durant el Neogen superior. Els relleus que presenten major altitud estan formats per materials calcaris del Lias, mentre que les valls s'han desenvolupat bé sobre les argiles del Keuper o bé damunt dels materials margocalcaris juràssecs i cretacs.

ramps, with polarity both to the NE and to the SW, would correspond to lateral or slightly oblique ramps which might provoke the thrust units to lower laterally and to eventually completely disappear.

Balanced cross-sections (SÀBAT, 1986) have enabled to evaluate the shortening in about 25 km, parallel to the transport direction in the Artà transversal. The presence of slightly oblique ramps has produced shortenings almost perpendicular to the transport direction which have resulted in folds concentrated in South of Manacor.

The relief of Serres de Llevant shows, predominantly smooth slopes and rounded forms. This fact should be attributed to erosion phases which had already reached maturity during the Upper Neogene. The highest reliefs are of Liassic limestones, while the valleys have well-developed on the Keuper clays or the Jurassic and Cretaceous marly limestones.

Agraïments

Els autors desitgen agrair a E. Descals, A. Ginés, J. Ginés, N. Llorente i G. Pons, els comentaris i correccions efectuats sobre el primer manuscrit que, de bon segur, han fet millorar el text final. Aquest treball s'ha vist beneficiat pels projectes d'investigació de la CICYT: GEO89-0426-CO2 i de la DGICYT: PB94-1175.

Bibliografia / References

- ÁLVARO, M. (1987): La tectónica de cabalgamientos de la Sierra Norte de Mallorca (Islas Baleares). *Bol. Geol. Miner.* 98/5 : 34-41.
- ANGLADA, E. (1985): *Estudi geològic del massís de Randa (Mallorca)*. Tesis de Licenciatura. Univ. de Barcelona, 111 pàgs.
- BARNOLAS, A. (Ed.) (1984): *Sedimentología del Jurásico de Mallorca*. Libro Guía de la Excursión. Grupo Español del Mesozoico. I.G.M.E. - C.G.S. 263 pàgs.
- BUTZER, K.W. & CUERDA, J. (1962): Nuevos yacimientos marinos cuaternarios de las Baleares. *Notas y Comun. del I.G.M.E.* 67 : 25-70.
- CALAFAT, F.; FORNÓS, J.J.; MARZO, M.; RAMOS-GUERRERO, E. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1986/87): Icnología de vertebrados en las facies Buntsandstein de Mallorca. *Acta Geológica Hispánica*. 21-22 : 515-520.
- COLOM, G. (1947): Estudios sobre la sedimentación profunda de las Baleares desde el Lias superior al Cenomanense-Turonense. *Inst. "Lucas Mallada" C.S.I.C.* 147 pàgs. 28 làms.
- COLOM, G. (1975): *Geología de Mallorca*. Institut d'Estudis Balearics. Dip. Prov. Balears. 2 vols. Palma de Mallorca.
- COLOM, G. (1985): Estratigrafia y paleontología del Andalucense y del Plioceno de Mallorca (Baleares). *Bol. Geol. Miner.* 96 : 235-302.
- CANALS, M.; SERRA-RAVENTÓS, J. & RIBA, O. (1982): Toponímia de la mar Catalano-Balear. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*. 26 : 169-194.
- CUERDA, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Inst. d'Estudis Balearics. Dip. Prov. Balears. 304 pàgs. 20 làms. Palma de Mallorca.
- DARDER, B. (1925): La tectonique de la région orientale de l'île de Majorque. *Bull. Soc. Géol. France*. 25 : 245-278.
- ENRIQUE, P. (1986): Nota sobre les roques hipabissals de la Serra de Tramuntana de Mallorca: Algunes característiques petrogràfiques i geoquímiques. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*. 30 : 19-50.
- ESCANDELL, B. & COLOM, G. (1960): Sur l'existence de diverses phases de plissements alpins dans l'île de Majorque. *Bull. Soc. Géol. France. Série 7, II (3)* : 267-272.
- FALLOT, P. (1922): *Étude géologique de la Sierra de Majorque*. Lib. Polyt. Ch. Beranger ed. 420 pàgs. Paris.
- FORNÓS, J.J. & POMAR, L. (1983): Mioceno Superior de Mallorca: Unidad Calizas de Santanyí (Complejo Terminal). In: *El Terciario de las Baleares. Guía de la Excursiones del X Congreso Nacional de Sedimentología*. Menorca.
- FORNÓS, J.J.; RODRÍGUEZ-PEREA, A. & SÀBAT, F. (1984): El Mesozoico de la Serra de Son Amoixa (Serres de Llevant, Mallorca). *I Congreso Español de Geología*. 1 : 173-185.
- FORNÓS, J.J.; RODRÍGUEZ-PEREA, A. & ARBONA, J. (1986/87): Brechas y paleokarst en los depósitos jurásicos de la Serra de Tramuntana de Mallorca. *Acta Geológica Hispánica*. 21-22 : 459-468.

Acknowledgements

The authors would like to thank E. Descals, A. Ginés, J. Ginés, N. Llorente and G. Pons for comments and corrections of the first manuscript which have significantly improved the final text. This work has partly benefited from the CICYT research projects: GEO89-0426-CO2 and DGICYT: PB94-1175.

- GELABERT, B.; SÀBAT, F. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1992): A structural outline of the Serra de Tramuntana of Mallorca (Balearic Islands). *Tectonophysics*. 203 : 167-183.
- MATAILLET, R. & PECHOUX, J. (1978): *Étude géologique de l'extrémité occidentale de la Sierra Nord de Majorque*. Tesis Doctoral, Univ. Franche-Comté.
- OLIVET, J.L.; BONNIN, J.; BEUZART, P. & AUZENDE, J.M. (1984): Cinématique de l'Atlantique nord et central. In: *Rapports scientifiques*. CNEXO. 108 pàgs. Paris.
- POMAR, L.; RODRÍGUEZ-PEREA, A.; SÀBAT, F. & FORNÓS, J.J. (1990): Neogene stratigraphy of Mallorca Island. In: AGUSTÍ, J.; DOMÈNEC, R.; JULIÀ, R. & MARTINELL, J. (Eds.): *Iberian Neogene Basins*. Field Guidebook. *Paleontologia i Evolució (Mem. Esp.)*. 2 : 271-320.
- RAMOS-GUERRERO, E.; MARZO, M.; POMAR, L. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1985): Estratigrafia y sedimentología del Paleógeno del Sector Occidental de la Sierra Norte de Mallorca. *Rev. d'Invest. Geol.* 40 : 29-63.
- RAMOS-GUERRERO, E.; RODRÍGUEZ-PEREA, A.; SÀBAT, F. & SERRA-KIEL, J. (1989): Cenozoic tectosedimentary evolution of Mallorca island. *Geodinamica Acta*. 3 (1) : 53-72.
- RAMOS-GUERRERO, E.; BERRIO, I.; FORNÓS, J.J. & MORGUES, L. (1994): The Middle Miocene Son Verdera lacustrine system (Santa Margalida Basin, Mallorca, NW Mediterranean). *Global Geological Record and Lake Basins* (IGCP Project 324. (in press).
- ROCA, E. (1992): *L'estructura de la Conca Catalano-Balear: Paper de la compressió i de la distensió en la seva gènesi*. Tesis Doctoral. Univ. Barcelona. 2 vols. 330 pàgs. 206 figs.
- ROCA, E. & VERGÉS, J. (1989): Estudio de la evolución neógena del sector suroccidental de la Serra de Tramuntana (Mallorca). *Bol. Geol. Miner.* C (5) : 842-852.
- RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1992): Geología de Mallorca. *Gran Enciclopèdia de Mallorca*. 8 : 225-238.
- RODRÍGUEZ-PEREA, A. & POMAR, L. (1983): El Mioceno de la Sierra Norte de Mallorca (Sector Occidental). *Acta Geológica Hispánica*. 18 : 105-116.
- RODRÍGUEZ-PEREA, A. & RAMOS-GUERRERO, E. (1984): Presencia de Paleozoico en la Sierra de Tramuntana (Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*. 28 : 145-148.
- RODRÍGUEZ-PEREA, A.; RAMOS-GUERRERO, E.; POMAR, L.; PANIELLO, X.; OBRADOR, A. & MARTÍ, J. (1987): El Triásico de las Baleares. *Cuadernos de Geología Ibérica*. 11 : 295-321.
- SÀBAT, F. (1986): *Estructura geològica de les Serres de Llevant de Mallorca (Balears)*. Tesis Univ. Barcelona, 120 pàgs. 2 vols.
- SIMA, A. & RAMÓN, X. (1986): Análisis sedimentológico y descripción de las secuencias deposicionales del Neógeno postorogénico de Mallorca. *Bol. Geol. Miner.* 157 : 445-472.